



## Replikasi DNA pada Prokariota: Tahapan dan Fungsi dalam Pewarisan Genetik

Ainun Mardia HM<sup>1\*</sup>, Huznul Amalia<sup>1</sup>, Adnan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pendidikan Biologi, Pascasarjana Universitas Negeri Makassar, Makassar 90222, Indonesia

\*e-mail korespondensi: [ainunhm1721@gmail.com](mailto:ainunhm1721@gmail.com)

### ABSTRACT

*DNA replication is an essential biological process that ensures the accurate inheritance of genetic information during every cell division, particularly in prokaryotic organisms that possess simple genomic structures and efficient replication mechanisms. Understanding DNA replication in prokaryotes is highly important because it plays a crucial role in maintaining genetic stability, supporting adaptation and evolution, and providing broad implications for biotechnology and antibiotic development. This article aims to comprehensively examine the mechanisms of DNA replication in prokaryotes and to explain their biological functions in genetic inheritance and cellular survival. The method employed in this article is a literature review through the analysis of various recent scientific sources, including national and international journals, discussing the stages of prokaryotic DNA replication, namely initiation, elongation, and termination, as well as the roles of the enzymes involved. The findings indicate that DNA replication in prokaryotes occurs in a semiconservative manner and involves the coordinated actions of various enzymes, such as DNA polymerase, helicase, and ligase, which function to maintain the accuracy and efficiency of replication. This process plays a significant role in preserving genetic stability, enabling adaptive mutations within controlled limits, and supporting the utilization of prokaryotes in biotechnology applications and the development of antimicrobial therapies.*

**Keywords:** Biotechnology, DNA Replication, Elongation, Genetic stability, Initiation, Termination.

### ABSTRAK

*Replikasi DNA merupakan proses biologis esensial yang memastikan pewarisan informasi genetik secara akurat pada setiap pembelahan sel, khususnya pada organisme prokariotik yang memiliki struktur genom sederhana dan mekanisme replikasi yang efisien. Pemahaman mengenai replikasi DNA pada prokariota sangat penting karena berperan dalam menjaga stabilitas genetik, mendukung adaptasi dan evolusi, serta memiliki implikasi luas dalam bidang bioteknologi dan pengembangan antibiotik. Penulisan artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif mekanisme replikasi DNA pada prokariota serta menjelaskan fungsi biologisnya dalam pewarisan genetik dan kelangsungan hidup sel. Metode yang digunakan dalam artikel ini adalah studi literatur dengan menganalisis berbagai sumber ilmiah terkini, termasuk jurnal nasional dan internasional, yang membahas tahapan replikasi DNA prokariota, yaitu inisiasi, elongasi, dan terminasi, beserta peran enzim-enzim yang terlibat. Hasil kajian menunjukkan bahwa replikasi DNA pada prokariota berlangsung secara semikonservatif dan melibatkan kerja terkoordinasi berbagai enzim, seperti DNA polimerase, helikase, dan ligase, yang berfungsi menjaga akurasi dan efisiensi replikasi. Proses ini berperan penting dalam mempertahankan stabilitas genetik, memungkinkan terjadinya mutasi adaptif dalam batas terkendali, serta mendukung pemanfaatan prokariota dalam aplikasi bioteknologi dan pengembangan terapi antimikroba.*

**Kata kunci:** Bioteknologi, Elongasi, Inisiasi, Replikasi DNA, Stabilitas genetik, Terminasi.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

## **PENDAHULUAN**

Deoxyribonucleic acid (DNA) merupakan molekul pembawa informasi genetik yang berperan fundamental dalam mengendalikan struktur, fungsi, dan pewarisan sifat pada seluruh organisme hidup, termasuk organisme prokariota (Jameson & Wilkinson, 2021). Informasi genetik yang tersimpan dalam DNA harus dipertahankan secara stabil agar tidak mengalami perubahan yang dapat mengganggu fungsi sel. Oleh karena itu, replikasi DNA menjadi proses seluler yang sangat krusial karena bertujuan menggandakan materi genetik secara akurat sebelum pembelahan sel berlangsung, sehingga setiap sel anak memperoleh salinan informasi genetik yang identik dengan sel induknya (Lewis & Spenkelink, 2022). Replikasi DNA pada prokariota menjadi dasar penting dalam pewarisan sifat dan bioteknologi modern, misalnya pada *Escherichia coli* yang digunakan sebagai sistem ekspresi gen rekombinan untuk produksi protein seperti insulin.

Replikasi DNA berperan penting dalam menjaga stabilitas genetik, yaitu kondisi di mana urutan basa DNA tetap terpelihara dari generasi ke generasi. Replikasi DNA prokariotik berperan penting dalam kedokteran melalui pengembangan antibiotik, dalam industri farmasi melalui produksi protein rekombinan seperti insulin menggunakan *E. coli*, serta dalam rekayasa genetika sebagai dasar teknik kloning dan konstruksi plasmid. Ketepatan proses ini didukung oleh mekanisme proofreading dan sistem perbaikan kesalahan yang dimiliki enzim DNA polimerase, sehingga risiko terjadinya mutasi dapat ditekan seminimal mungkin. Dengan demikian, replikasi DNA tidak hanya berfungsi sebagai sarana pewarisan informasi genetik, tetapi juga sebagai mekanisme biologis utama dalam mencegah akumulasi mutasi yang berpotensi merusak fungsi sel dan mengganggu kelangsungan hidup organisme.

Pada organisme prokariota, replikasi DNA memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan eukariota. Prokariota tidak memiliki membran inti (nukleus), sehingga seluruh proses replikasi berlangsung langsung di sitoplasma. Selain itu, genom prokariota umumnya berupa satu molekul DNA sirkuler tunggal yang memiliki satu titik awal replikasi (*origin of replication*), sehingga proses replikasi berlangsung lebih sederhana, cepat, dan efisien. Sebaliknya, organisme eukariota memiliki DNA linear yang tersimpan di dalam nukleus serta memiliki banyak origin replikasi, sehingga mekanisme pengaturannya lebih kompleks (Windgassen et al., 2020). Organisme prokariota, yang mencakup bakteri dan arkea, memiliki struktur genom yang lebih sederhana dibandingkan dengan eukariota, umumnya berupa DNA sirkuler tunggal yang terletak di sitoplasma tanpa membran inti yang membatasinya (Beattie & Reyes-Lamothe, 2021).

Salah satu peran krusialnya adalah dalam pengembangan terapi antimikroba. Banyak antibiotik bekerja dengan cara menghambat enzim-enzim vital dalam proses replikasi, seperti DNA girase dan helikase. Oleh karena itu, memahami detail mekanisme ini menjadi sangat penting, terutama dalam menghadapi tantangan global seperti resistensi antibiotik yang terus meningkat (Baker & Bell, 1998). Dalam konteks rekayasa genetika, replikasi DNA pada bakteri seperti *Escherichia coli* memungkinkan produksi protein rekombinan berskala industri, seperti insulin dan vaksin. Keberhasilan sintesis biologis tersebut

sangat bergantung pada efisiensi replikasi plasmid yang membawa gen target (Doudna & Charpentier, 2014).

Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan teknologi di bidang mikroskopi dan biokimia molekuler telah secara signifikan memperluas pemahaman ilmuwan mengenai mekanisme replikasi DNA pada organisme prokariota. Penerapan teknik mikroskopi fluoresensi resolusi tinggi, seperti *super-resolution fluorescence microscopy* (STED dan PALM), serta metode pelacakan molekul tunggal (single-molecule tracking) memungkinkan para peneliti mengamati secara langsung dinamika kerja kompleks replisom selama proses replikasi berlangsung. Selain itu, penggunaan pendekatan time-lapse imaging dan analisis protein berlabel fluoresen memberikan gambaran rinci mengenai interaksi protein-protein kunci yang terlibat dalam inisiasi, elongasi, dan terminasi replikasi DNA. Dengan bantuan teknik canggih seperti mikroskopi fluoresensi beresolusi tinggi dan pelacakan molekul tunggal, para peneliti kini dapat mengamati secara langsung dinamika kerja *replisome*—kompleks multiprotein yang memainkan peran utama dalam proses replikasi (Lewis & Spenkellink, 2022). Temuan ini tidak hanya memperdalam wawasan tentang dasar-dasar biologi molekuler, tetapi juga membuka peluang baru dalam pengembangan terapi, termasuk antibiotik inovatif yang secara spesifik menargetkan mekanisme replikasi DNA pada bakteri patogen (Merchel-Piovesan & De Bont, 2022).

Studi oleh Richardson et al (2019), mengungkapkan peran penting elemen DnaA-trio pada asal replikasi bakteri dalam pengikatan inisiator DNA untai tunggal, yang merupakan langkah krusial dalam inisiasi replikasi DNA. Penelitian ini memperdalam pemahaman kita tentang spesifisitas tempat inisiasi replikasi pada bakteri. Di sisi lain, studi yang dilakukan oleh Marinus & Løbner-Olesen (2020) menunjukkan keterkaitan antara proses metilasi DNA dengan virulensi bakteri, mengindikasikan bahwa modifikasi epigenetik dalam DNA prokariotik dapat memengaruhi tingkat patogenisitas serta interaksi bakteri dengan inangnya.

Lebih lanjut, pemahaman mengenai replikasi DNA pada organisme prokariota memberikan kontribusi penting dalam kajian evolusi molekuler, khususnya dalam menjelaskan asal-usul dan konservasi mekanisme replikasi pada berbagai kelompok organisme. Meskipun prinsip dasar replikasi DNA tampak serupa di seluruh domain kehidupan, penelitian terbaru mengungkap adanya variasi signifikan dalam komposisi dan regulasi sistem replikasi di antara kelompok prokariota yang berbeda, mencerminkan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang beragam (Jameson & Wilkinson, 2021).

Selain itu, kajian mengenai mekanisme restart replikasi DNA setelah terjadinya gangguan atau kerusakan DNA membuka perspektif baru dalam pengembangan strategi terapi antimikroba. Restart replikasi merupakan proses pemulihan kelanjutan sintesis DNA yang terhenti akibat hambatan seperti kerusakan DNA atau konflik antara replikasi dan transkripsi. Jalur ini melibatkan protein-protein khusus yang tidak selalu esensial pada kondisi normal, tetapi menjadi sangat penting bagi kelangsungan hidup sel bakteri dalam kondisi stres. Oleh karena itu, jalur restart replikasi dipandang sebagai target terapeutik yang menjanjikan, karena penghambatannya berpotensi mengganggu kemampuan bakteri patogen untuk

bertahan hidup, terutama di tengah meningkatnya kasus resistensi antimikroba (Merchel-Piovesan & De Bont, 2022).

Artikel ini bertujuan untuk mengulas secara komprehensif proses replikasi DNA pada prokariota, mulai dari inisiasi, elongasi, hingga terminasi, serta fungsi biologisnya dalam konteks kelangsungan hidup dan perkembangbiakan organisme prokariota.

## **METODE**

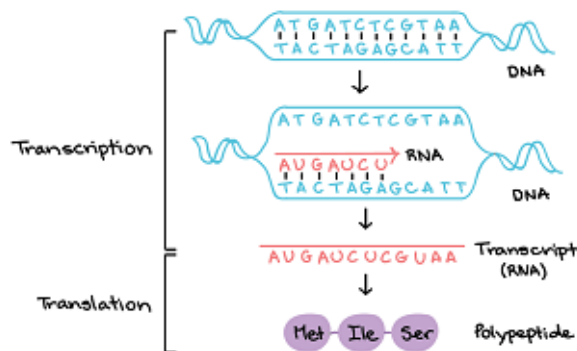
Penulisan artikel ini menggunakan pendekatan studi literatur (*library research*) dengan menganalisis berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan mekanisme replikasi DNA pada organisme prokariota. Sumber data diperoleh dari artikel jurnal nasional dan internasional bereputasi yang terindeks pada basis data ilmiah, seperti Google Scholar, PubMed, dan Scopus, serta buku teks biologi molekuler yang relevan. Literatur dipilih berdasarkan kriteria relevansi topik, kredibilitas penerbit, dan keterkinian publikasi, dengan rentang tahun terbit terutama dalam sepuluh tahun terakhir.

Proses penelusuran literatur dilakukan menggunakan kata kunci antara lain “*DNA replication in prokaryotes*”, “*prokaryotic replisome*”, “*replication regulation*”, “*DNA replication restart*”, dan “*bacterial genome replication*”. Literatur yang terpilih selanjutnya dianalisis secara kualitatif-deskriptif melalui sintesis naratif, dengan menelaah tahapan replikasi DNA, enzim-enzim yang terlibat, mekanisme regulasi genetik, serta implikasi biologisnya. Hasil analisis disusun secara sistematis untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai peran replikasi DNA dalam pewarisan sifat genetik, adaptasi, dan kelangsungan hidup organisme prokariota.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Proses Replikasi DNA**

Replikasi DNA merupakan proses fundamental dalam pembelahan sel yang berfungsi memastikan setiap sel anakan menerima salinan materi genetik yang identik. Ketepatan proses ini sangat penting karena kesalahan dalam replikasi DNA dapat menyebabkan mutasi genetik yang berpotensi mengganggu fungsi sel dan memicu berbagai kelainan biologis. Dalam ilmu virologi, replikasi virus merujuk pada proses ketika virus menginfeksi sel dan menggunakan mesin seluler inang untuk menggandakan materi genetiknya dan membentuk partikel virus baru. Proses ini mencakup beberapa tahap: adsorpsi (penempelan), penetrasi, pelepasan genom (uncoating), replikasi dan transkripsi, sintesis protein virus, perakitan, dan pelepasan virion dari sel inang (Permata Sari et al., 2023). Replikasi dalam konteks virologi juga merujuk pada proses perbanyak diri virus di dalam sel inang (Luthifah & Zulyusri, 2024). Pada virus, proses replikasi sepenuhnya bergantung pada sel inang, sedangkan pada organisme prokariot seperti *Escherichia coli*, replikasi DNA berlangsung secara mandiri di dalam sel dan berlangsung dengan mekanisme yang efisien dan terkontrol. Replikasi DNA pada prokariot terjadi melalui tiga tahap utama, yaitu inisiasi, elongasi, dan terminasi. Mekanisme ini berperan penting dalam menjaga kesinambungan informasi genetik serta mendukung keberlangsungan hidup, adaptasi, dan reproduksi seluler (Leonard & Méchali, 2022).



**Gambar 1.** Proses Transkripsi

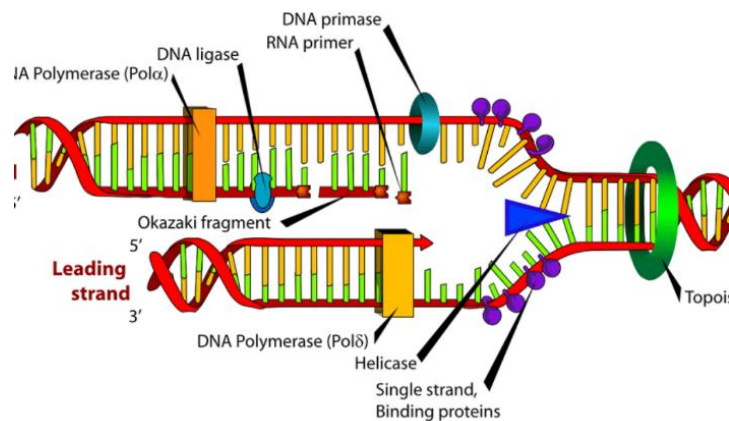
*Sumber: Biologi (2017)*

## Inisiasi

Proses awal sintesis protein pada sel eukariotik dimulai di dalam inti sel karena molekul DNA berukuran sangat besar sehingga tidak dapat melewati membran inti. Oleh karena itu, informasi genetik pada DNA terlebih dahulu ditranskripsikan menjadi molekul RNA melalui proses transkripsi dengan menggunakan DNA sebagai cetakan. Molekul RNA yang dihasilkan, khususnya RNA duta (mRNA), berukuran lebih kecil sehingga mampu keluar dari inti sel menuju sitoplasma melalui pori-pori inti untuk selanjutnya menjalani proses translasi dan disintesis menjadi protein. Pembentukan RNA dari DNA memerlukan peran enzim RNA polimerase, ion logam seperti magnesium atau mangan sebagai kofaktor, serta energi yang berasal dari ikatan fosfat berenergi tinggi pada nukleotida (Silverthorn et al., 2013). Sebagian besar regulasi gen terjadi pada tahap awal transkripsi, yaitu saat pembentukan kompleks pre-inisiasi transkripsi (PIC). Kompleks ini terdiri atas berbagai faktor transkripsi seperti TF IIA, IIB, IID, IIE, IIF, dan IIH, serta protein pengikat kotak TATA (TATA-box binding protein), yang bersama RNA polimerase II membentuk kompleks inisiasi (IC). Tahap inisiasi ini berlangsung di bagian hulu atau ujung 5' dari wilayah promotor gen. Pembentukan PIC biasanya juga memerlukan peran enzim histon asetiltransferase dan kompleks perombakan kromatin, yang berfungsi membuka struktur kromatin agar promotor menjadi lebih mudah diakses. Selain itu, proses inisiasi turut dikendalikan oleh elemen pengatur seperti enhancer dan silencer, yang merespons sinyal awal dalam proses transduksi sinyal (Hidayah, 2025).

Transkripsi melibatkan enzim RNA polimerase II (RNAP II), yang berperan dalam menyalin gen-gen pengkode protein serta bagian lain dari genom. Pada organisme eukariotik, RNAP II tersusun atas 12 subunit, yang menjadi ciri pembeda utama dibandingkan dengan RNA polimerase I dan III (Schier & Taatjes, 2020). Pada *E. coli*, replikasi DNA berlangsung relatif cepat dan efisien, dengan laju sekitar 1.000 pasangan basa per detik. Replikasi dimulai pada titik spesifik yang disebut *origin of replication* (OriC). Daerah OriC pada *E. coli* memiliki panjang sekitar 245 pasangan basa dan kaya akan urutan basa adenin dan timin (A–T), yang memiliki ikatan hidrogen lebih lemah dibandingkan pasangan basa guanin dan sitosin (G–C). Kondisi ini memudahkan proses pemisahan untai DNA pada tahap awal replikasi, sehingga memungkinkan enzim-enzim replikasi bekerja secara optimal.

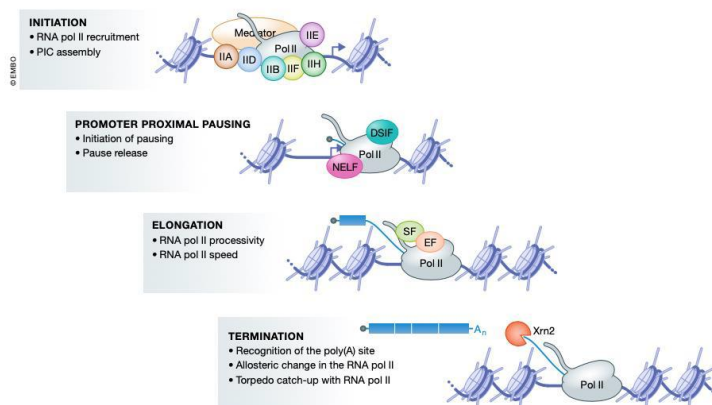
Proses ini berlangsung secara semikonservatif, yaitu setiap molekul DNA hasil replikasi terdiri atas satu untai DNA lama dan satu untai DNA baru. Replikasi ini dimulai pada titik tertentu yang disebut origin of replication (OriC). Pada *E. coli*, OriC adalah segmen DNA sepanjang sekitar 245 pasangan basa yang mengandung banyak urutan kaya basa adenin dan timin (A-T), yang cenderung lebih mudah dipisahkan karena hanya memiliki dua ikatan hidrogen. Proses inisiasi dimulai saat protein DnaA berikatan dengan daerah khusus (DnaA-box) di OriC dan menyebabkan pembukaan lokal heliks ganda DNA (Katayama et al., 2017). Selanjutnya, helikase DnaB dimuat ke DNA oleh protein DnaC dan mulai memisahkan kedua untai DNA, menciptakan struktur yang disebut replication fork. Protein SSB (*Single-Stranded Binding proteins*) akan menjaga agar untai tunggal DNA tetap terbuka dan stabil. Setelah itu, primase (DnaG) mensintesis RNA primer pendek sebagai titik awal bagi DNA polimerase.



**Gambar 2.** Arah Replikasi DNA

*Sumber: Caiherang (2020)*

Setelah proses inisiasi transkripsi berlangsung, RNA polimerase II (RNAP II) memasuki fase penundaan atau jeda yang dikenal sebagai *promoter-proximal pausing*. Pada mamalia dan beberapa organisme metazoa lainnya, penundaan ini biasanya terjadi sekitar 25 hingga 50 pasangan basa di hilir dari titik awal transkripsi (TSS/transcription start site). Mekanisme jeda ini berfungsi sebagai strategi untuk secara signifikan mengatur dan memperlambat laju siklus transkripsi (Muniz et al., 2021).



**Gambar 3.** Perkembangan teori terhadap terjadinya proses transkripsi pada sel

*Sumber: Gontor (2025)*

## **Elongasi**

Setelah melewati fase jeda (pause), RNA polymerase II (RNAP II) memasuki tahap elongasi transkripsi yang dikendalikan oleh dua parameter utama, yaitu prosesivitas dan kecepatan transkripsi. Prosesivitas mengacu pada kemampuan RNAP untuk terus bergerak sepanjang untai DNA cetakan dan mensintesis RNA secara berkelanjutan tanpa terhenti. RNA polymerase (RNAP) dengan tingkat prosesivitas yang tinggi mampu mensintesis transkrip RNA berukuran panjang tanpa melepaskan diri dari DNA cetakan. Namun, pada sel eukariotik, prosesivitas RNA polymerase II (RNAP II) tidak bersifat konstan karena sangat dipengaruhi oleh kondisi struktur kromatin dan integritas DNA. Di sisi lain, kecepatan transkripsi mengukur seberapa cepat RNAP menyintesis nukleotida dalam satuan waktu tertentu. Menariknya, selama fase elongasi, RNAP II tidak memerlukan banyak protein tambahan untuk menjalankan fungsinya. Hal ini dimungkinkan karena RNAP II memiliki struktur kompleks yang terdiri atas 12 subunit protein, yang berperan penting dalam membantu aktivitas seperti membuka heliks DNA (melalui aktivasi helicase), menjaga stabilitas proses transkripsi (dengan fungsi seperti sliding clamp), serta mengikat untai tunggal DNA (ssDNA) dan mendukung berbagai fungsi lainnya (Muniz et al., 2021).

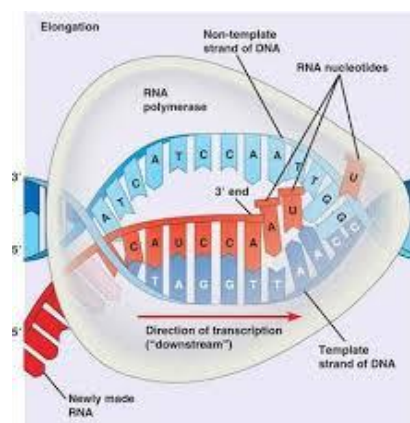
Tahap selanjutnya adalah elongasi, yaitu pemanjangan untaian DNA baru. Enzim utama dalam tahap ini adalah DNA polimerase III holoenzyme, yang memiliki kemampuan sintesis untai DNA dari arah 5' ke 3'. Pada untai yang sejajar dengan arah pergerakan helicase, yaitu leading strand, DNA disintesis secara kontinu. Namun pada lagging strand, karena orientasi antiparalel DNA, sintesis terjadi secara diskontinu dalam segmen-segmen pendek yang disebut fragmen Okazaki. Setiap fragmen ini memerlukan RNA primer baru. Setelah sintesis selesai, DNA polimerase I akan menggantikan RNA primer dengan DNA, kemudian DNA ligase menyambungkan fragmen-fragmen Okazaki tersebut dengan membentuk ikatan fosfodiester (Kelman & O'Donnell, 2023). Proses elongasi ini juga melibatkan mekanisme proofreading, di mana DNA polimerase III mampu mengoreksi kesalahan pemasangan basa melalui aktivitas eksoribonuklease 3' ke 5', sehingga tingkat kesalahan replikasi tetap rendah dan stabil secara genetik (Sinha & Raychaudhuri, 2021).

RNA polymerase II (RNAP II), bekerja sama dengan enzim helicase, membuka heliks ganda DNA dengan memutuskan ikatan hidrogen antar pasangan basa nitrogen. Setelah RNAP II melewati wilayah tertentu, bagian DNA yang telah terbuka akan kembali berpasangan membentuk struktur heliks seperti semula. Pada proses ini, salah satu untai DNA yang dikenal sebagai sense strand berfungsi sebagai cetakan untuk sintesis RNA, sedangkan untai lainnya, yaitu antisense strand, tetap tidak aktif dan tidak mengalami proses transkripsi. Proses sintesis RNA berlangsung di dalam gelembung transkripsi, yaitu daerah terbuka sepanjang sekitar 25 pasangan basa DNA di mana heliks ganda telah terurai. Dalam proses ini, sekitar delapan nukleotida RNA yang baru terbentuk tetap berikatan dengan untai DNA cetakan, sementara bagian RNA yang lebih panjang akan terlepas untuk memungkinkan DNA yang telah dilalui kembali menggulung menjadi heliks ganda. Selama transkripsi, setiap basa nitrogen pada untai DNA sense akan dipasangkan dengan basa RNA yang bersifat komplementer, mengikuti prinsip pasangan basa seperti pada replikasi

DNA. Misalnya, jika urutan DNA adalah AGTAC, maka RNA yang terbentuk dari cetakan tersebut memiliki urutan komplementer UCAUG. (Silverthorn et al., 2013).

Hambatan struktural seperti keberadaan nukleosom serta kerusakan DNA (*DNA damage*) dapat mengganggu pergerakan RNAP II, sehingga memicu terjadinya *pausing*, *backtracking*, atau bahkan *transcriptional arrest*. Mekanisme ini berfungsi sebagai bagian dari sistem pengawasan seluler untuk memastikan akurasi transkripsi dan koordinasi antara proses transkripsi dengan perbaikan DNA. Di sisi lain, kecepatan transkripsi mengukur seberapa cepat RNAP menyintesis nukleotida dalam satuan waktu tertentu. Menariknya, selama fase elongasi, RNAP II tidak memerlukan banyak protein tambahan untuk menjalankan fungsinya. Hal ini dimungkinkan karena RNAP II memiliki struktur kompleks yang terdiri atas 12 subunit protein, yang berperan penting dalam membantu aktivitas seperti membuka heliks DNA (melalui aktivasi helicase), menjaga stabilitas proses transkripsi (dengan fungsi seperti sliding clamp), serta mengikat untai tunggal DNA (ssDNA) dan mendukung berbagai fungsi lainnya (Muniz et al., 2021).

Enzim utama pada tahap elongasi replikasi DNA prokariotik adalah DNA polimerase III holoenzyme, yang merupakan bagian integral dari kompleks replisom dan berperan dalam sintesis untai DNA baru dengan arah 5' ke 3'. Pada untai yang sejajar dengan arah pergerakan helikase (leading strand), sintesis DNA berlangsung secara kontinu. Sebaliknya, pada lagging strand yang berorientasi antiparalel, sintesis DNA terjadi secara diskontinu dalam bentuk fragmen-fragmen Okazaki. Pembentukan setiap fragmen diawali oleh sintesis RNA primer sepanjang sekitar 10–12 nukleotida oleh enzim primase (DnaG), yang kemudian dikenali oleh DNA polimerase III sebagai titik awal elongasi. DNA polimerase III holoenzyme memiliki subunit  $\beta$ -clamp yang berfungsi meningkatkan prosesivitas enzim dengan menjaga polimerase tetap melekat pada DNA cetakan selama sintesis berlangsung. Selain itu, subunit  $\epsilon$  memberikan aktivitas proofreading melalui fungsi eksodeoksiribonuklease 3' ke 5', yang memungkinkan koreksi kesalahan pemasangan basa secara langsung selama elongasi. Setelah sintesis fragmen Okazaki selesai, DNA polimerase I menggantikan RNA primer dengan DNA, dan DNA ligase menyambungkan fragmen-fragmen tersebut melalui pembentukan ikatan fosfodiester. Keseluruhan mekanisme ini memastikan replikasi DNA berlangsung cepat, efisien, dan tetap mempertahankan stabilitas genetic (Kelman & O'Donnell, 2023).



**Gambar 4.** Elongasi

**Sumber:** Universitas Esa Unggul (2020)

RNA polymerase II (RNAP II) bergerak sepanjang untai DNA cetakan dengan arah 3' ke 5', sambil mengkatalisis sintesis molekul RNA baru dalam arah berlawanan, yaitu 5' ke 3'. Dalam proses ini, RNAP II menambahkan nukleotida baru secara bertahap ke ujung 3' dari rantai RNA yang sedang dibentuk (Hidayah, 2025). Saat RNA disintesis, nukleotida-nukleotida RNA berpasangan dengan basa-basa pada untai DNA sense untuk membentuk untai tunggal RNA. Selama proses transkripsi ini, pemasangan basa terjadi dengan kecepatan rata-rata sekitar 40 basa per detik. Pada manusia, molekul RNA yang paling panjang bisa mencapai hingga 5.000 basa, sehingga keseluruhan proses transkripsi dapat berlangsung lebih dari satu menit—durasi yang tergolong cukup panjang untuk aktivitas seluler. Ketika RNA polymerase mencapai urutan kodon stop, enzim tersebut menghentikan penambahan nukleotida dan melepaskan untai RNA yang telah terbentuk dari cetakan DNA (Silverthorn et al., 2013).

Dalam proses ini, RNAP II menambahkan nukleotida baru secara bertahap ke ujung 3' dari rantai RNA yang sedang dibentuk (Hidayah, 2025). Saat RNA disintesis, nukleotida-nukleotida RNA berpasangan dengan basa-basa pada untai DNA sense untuk membentuk untai tunggal RNA. Selama proses transkripsi, pemasangan nukleotida oleh RNA polymerase II berlangsung dengan kecepatan rata-rata sekitar 40 nukleotida per detik. Namun, laju ini tidak bersifat konstan dan dapat bervariasi secara signifikan bergantung pada berbagai faktor. Struktur kromatin, khususnya tingkat pepadatan nukleosom dan modifikasi histon, dapat memperlambat atau memfasilitasi pergerakan RNAP II sepanjang DNA. Selain itu, regulasi pascatranslasi RNAP II, seperti fosforilasi pada domain C-terminal (*C-terminal domain*, CTD), berperan penting dalam mengatur transisi antar tahap transkripsi dan efisiensi elongasi. Kondisi seluler, termasuk ketersediaan nukleotida, status metabolik, serta respons terhadap stres atau kerusakan DNA, juga turut memengaruhi variabilitas kecepatan transkripsi. Dengan demikian, kecepatan sintesis RNA mencerminkan integrasi kompleks antara faktor struktural, regulatori, dan fisiologis sel. Pada manusia, molekul RNA yang paling panjang bisa mencapai hingga 5.000 basa, sehingga keseluruhan proses transkripsi dapat berlangsung lebih dari satu menit—durasi yang tergolong cukup panjang untuk aktivitas seluler. Ketika RNA polymerase mencapai urutan kodon stop, enzim tersebut menghentikan penambahan nukleotida dan melepaskan untai RNA yang telah terbentuk dari cetakan DNA (Silverthorn et al., 2013).

### **Terminasi**

Tahap terakhir dalam replikasi DNA adalah terminasi, yang terjadi ketika dua replication forks bertemu di daerah yang disebut terminus. Di *E. coli*, terdapat urutan Ter sites yang berfungsi menghentikan proses replikasi secara teratur. Protein Tus (terminus utilization substance) akan berikatan dengan Ter sites untuk menghentikan laju helikase dari satu arah sehingga memungkinkan pertemuan antar fork terjadi dengan rapi. Protein Tus (*terminus utilization substance*) berikatan secara spesifik dengan sekuens *Ter* (*termination sites*) untuk menghentikan pergerakan helikase dari satu arah, sehingga memastikan pertemuan dua *replication fork* berlangsung secara terkoordinasi dan terkontrol. Mekanisme Tus–Ter ini berperan penting dalam terminasi replikasi DNA pada *Escherichia coli*, karena mencegah terjadinya replikasi berlebih atau tabrakan tidak teratur antar fork. Namun demikian, studi menunjukkan bahwa sistem replikasi juga memiliki mekanisme pengaman tambahan apabila interaksi Tus–Ter mengalami gangguan.

Dalam kondisi tertentu, *replication fork* yang lolos dari hambatan Tus–Ter tetap dapat dihentikan melalui mekanisme alternatif, seperti kolaps fork yang diikuti oleh proses rekombinasi homolog dan pemulihan replikasi oleh protein RecA dan kompleks enzim perbaikan DNA. Mekanisme cadangan ini menegaskan bahwa terminasi replikasi tidak sepenuhnya bergantung pada sistem Tus–Ter, melainkan merupakan bagian dari jaringan pengawasan replikasi yang menjaga stabilitas genom (Sharma & Chattoraj, 2015). Setelah replikasi selesai, dua molekul DNA biasanya masih saling terkait (disebut catenane) dan harus dipisahkan oleh enzim topoisomerase IV, agar masing-masing molekul DNA dapat didistribusikan ke sel anak pada saat pembelahan (Kleckner, N., Zickler, D., Jones, 2018).

Ketika RNA polymerase II (RNAP II) mencapai bagian akhir dari suatu gen, proses transkripsi akan dihentikan. Pada sebagian besar gen pengkode protein, terminasi transkripsi ini bergantung pada pengenalan situs poli(A). Situs ini diidentifikasi oleh kompleks pemotongan dan poliadenilasi, yang terdiri atas berbagai faktor multi-subunit. Komponen utama dari kompleks ini mencakup CPSF (cleavage and polyadenylation specificity factor), CstF (cleavage stimulatory factor), serta faktor pemotongan I dan II (CF I dan CF II), yang semuanya bekerja sama untuk memastikan pemrosesan akhir transkrip RNA berjalan dengan tepat (Hidayah, 2025).

Setelah situs poli(A) dikenali oleh subunit CPSF30 dan WDR33 dari kompleks CPSF, pre-mRNA yang baru terbentuk akan dipotong oleh enzim endonuklease CPSF73. Pemotongan ini terjadi di ujung 3' pre-mRNA, yang kemudian mengalami proses poliadenilasi, sedangkan ujung 5' yang tidak terlindungi menjadi target masuk bagi enzim Xrn2, yaitu 5'-eksonuklease. Enzim Xrn2 kemudian mulai mendegradasi transkrip RNA yang melewati situs poli(A), dan aktivitas ini mengarah pada pelepasan RNA polymerase dari DNA cetakan, yang menandai berakhirnya transkripsi. Selain itu, transkripsi melalui situs poli(A) memicu perubahan bentuk atau perubahan alosterik pada kompleks elongasi transkripsi, yang dimediasi oleh dephosphorylasi protein Spt5 oleh enzim fosfatase PP1. Perubahan ini memperlambat laju elongasi transkripsi sekitar dua hingga tiga kali lipat, yang pada gilirannya mempermudah Xrn2 untuk mengejar dan menghentikan RNA polymerase II secara efisien (Muniz et al., 2021).

### **Fungsi Biologis Replikasi DNA dalam Konteks Kehidupan dan Perkembangbiakan Prokariota**

Replikasi DNA merupakan proses biologis yang sangat penting dalam siklus hidup sel prokariotik. Dalam artikel yang ditulis oleh Prayogi et al (2024), replikasi DNA dijelaskan sebagai tahap krusial yang menjamin setiap sel anak menerima salinan lengkap dari materi genetik sel induknya. Proses ini berlangsung sebelum pembelahan sel, dan menjadi dasar utama bagi kelangsungan informasi genetik dari satu generasi ke generasi selanjutnya. Fungsi ini sangat vital bagi organisme prokariotik yang berkembang biak secara aseksual melalui pembelahan biner, karena tanpa replikasi DNA yang akurat, sel anak tidak akan memiliki informasi genetik yang diperlukan untuk bertahan hidup dan menjalankan fungsinya.

Lebih lanjut, penulis menyatakan bahwa mekanisme replikasi DNA tidak hanya berperan dalam kelangsungan informasi genetik, tetapi juga menjaga kestabilan genom dalam jangka tahankan fungsi-fungsi vitalnya, seperti metabolisme, pertahanan terhadap tekanan lingkungan, dan kemampuan untuk

bereproduksi. Replikasi DNA yang berjalan dengan akurat didukung oleh enzim-enzim seperti DNA polimerase yang memanjang. Hal ini menjadi penting karena kestabilan genetik memungkinkan sel memperlakukan kemampuan proofreading, serta keberadaan checkpoint replikasi yang berfungsi sebagai mekanisme kontrol kualitas sebelum pembelahan dilanjutkan.

Dalam konteks organisme prokariotik, yang umumnya memiliki siklus hidup cepat dan reproduksi yang efisien, replikasi DNA menjadi kunci untuk mempertahankan pertumbuhan populasi secara berkelanjutan. Melalui proses ini, organisme prokariot dapat memastikan pewarisan sifat yang stabil serta mempertahankan keutuhan informasi genetik dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, seperti yang ditegaskan dalam artikel tersebut, pemahaman tentang replikasi DNA menjadi fondasi penting dalam mempelajari genetika, biologi sel, serta evolusi organisme.

Fungsi biologis dari replikasi DNA dalam konteks kehidupan dan perkembangbiakan organisme prokariota sangatlah vital, karena proses ini menjadi dasar utama bagi keberlangsungan hidup dan pewarisan sifat genetik dari satu generasi ke generasi berikutnya. Replikasi DNA merupakan proses menggandakan materi genetik yang terjadi sebelum pembelahan sel, sehingga memastikan bahwa setiap sel anak menerima salinan informasi genetik yang identik dengan sel induknya (Sanhueza et al., 2021). Dalam prokariota seperti bakteri, proses ini sangat efisien dan terkoordinasi, berlangsung cepat untuk mengakomodasi siklus hidup yang singkat dan tingkat pertumbuhan yang tinggi.

Prokariota berkembang biak terutama melalui pembelahan biner, suatu mekanisme aseksual di mana satu sel membelah menjadi dua sel identik. Sebelum pembelahan terjadi, DNA kromosom harus direplikasi sepenuhnya agar masing-masing sel anak memiliki salinan DNA yang lengkap. Tanpa replikasi DNA yang akurat, pembelahan sel tidak akan menghasilkan keturunan yang layak, karena informasi genetik yang penting bagi fungsi seluler akan hilang atau rusak (Soubry et al., 2019). Oleh karena itu, replikasi DNA tidak hanya memastikan kontinuitas informasi genetik, tetapi juga menjadi mekanisme adaptasi dan kelangsungan hidup prokariota di berbagai lingkungan.

Selain itu, proses replikasi DNA pada prokariota juga berperan penting dalam mekanisme evolusi dan variabilitas genetik. Meskipun replikasi DNA berlangsung dengan tingkat kesalahan yang sangat rendah, mutasi kecil yang terjadi selama proses ini dapat berkontribusi pada munculnya sifat-sifat baru yang dapat menguntungkan dalam kondisi lingkungan tertentu (Kuhlman & Cox, 2018). Selain itu, proses replikasi DNA pada prokariota juga berperan penting dalam mekanisme evolusi dan variabilitas genetik. Meskipun replikasi DNA berlangsung dengan tingkat kesalahan yang sangat rendah, Mutasi kecil yang terjadi selama proses replikasi atau transkripsi dapat berkontribusi pada munculnya variasi genetik dan sifat-sifat baru yang berpotensi menguntungkan dalam kondisi lingkungan tertentu. Namun, frekuensi terjadinya mutasi serta dampak biologisnya sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara mekanisme koreksi kesalahan (*proofreading*) dan sistem perbaikan DNA di satu sisi, serta tekanan seleksi alam di sisi lain. Interaksi antara tingkat kesalahan molekuler dan seleksi lingkungan ini secara kolektif menentukan tingkat evolubilitas suatu populasi, yaitu kemampuan populasi untuk menghasilkan variasi genetik yang cukup guna beradaptasi tanpa mengorbankan stabilitas genom secara berlebihan Dalam konteks resistensi

antibiotik, misalnya, mutasi pada gen tertentu dapat memungkinkan bakteri bertahan terhadap pengobatan, yang menunjukkan bagaimana replikasi DNA memainkan peran tidak langsung dalam seleksi alam.

Secara keseluruhan, replikasi DNA dalam organisme prokariotik tidak hanya mendasari proses pewarisan dan pertumbuhan populasi, tetapi juga berperan dalam dinamika adaptasi dan kelangsungan spesies dalam jangka panjang. Akurasi, efisiensi, dan regulasi proses ini sangat penting dalam menjaga stabilitas genetik, sekaligus memberikan ruang bagi evolusi melalui mutasi dan seleksi.

## **KESIMPULAN**

Replikasi DNA pada prokariota merupakan proses fundamental yang terdiri dari tiga tahap utama (inisiasi, elongasi, dan terminasi). Proses ini dilakukan secara semikonservatif dan melibatkan berbagai protein dan enzim khusus untuk memastikan akurasi dan efisiensi pewarisan informasi genetik. Selain penting untuk kelangsungan hidup dan reproduksi, replikasi DNA juga berperan dalam menjaga kestabilan genetik, memungkinkan adaptasi evolusioner melalui mutasi, serta berkontribusi pada pengembangan bioteknologi dan terapi antimikroba.

Adapun saran dari penulis yaitu Diperlukan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme molekuler replikasi DNA melalui pendekatan eksperimental dan teknologi visualisasi molekuler canggih. Studi lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi potensi enzim-enzim replikasi sebagai target pengembangan antibiotik baru, terutama dalam menghadapi krisis resistensi antimikroba. Serta Penelitian lintas disiplin antara biologi molekuler dan bioteknologi perlu ditingkatkan guna mengoptimalkan aplikasi proses replikasi DNA dalam industri farmasi dan kedokteran.

## **DAFTAR RUJUKAN**

- Baker, T. A., & Bell, S. P. (1998). Polymerases and the replisome: Machines within machines. *Cell*, 92(3), 295–305. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)80923-5](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)80923-5)
- Beattie, T. R., & Reyes-Lamothe, R. (2021). Replisome dynamics during chromosome duplication. *Molecular Microbiology*, 115(1), 4–16.
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 102–111. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
- Hidayah, N. (2025). Regulasi Transkripsi Dan Pasca Transkripsi Pada Ekspresi Gen. *Darussalam Medical Journal*, 1(1), 28–36.
- Jameson, K. H., & Wilkinson, A. A. (2021). Mechanism and regulation of DNA replication initiation in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 19(8), 479–490.
- Katayama, T., Kasho, K., & Kawakami, H. (2017). The DnaA cycle in *Escherichia coli*: Activation, function and inactivation of the initiator protein. *Frontiers in Microbiology*, 8(2), 2496–2511. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02496>
- Kelman, L. M., & O'Donnell, M. E. (2023). The replisome and its regulation in prokaryotes. *Annual Review of Biochemistry*, 92(8), 1–28. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-040723>

- Kleckner, N., Zickler, D., Jones, G. H. (2018). Recombination, pairing, and synapsis of homologs during meiosis. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 10(6), 211–221. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a016626>
- Kuhlman, T. E., & Cox, E. C. (2018). Gene location and DNA density determine transcription factor distributions in *Escherichia coli*. *Biology Molecular Systems*, 14(3), 113–122. <https://doi.org/10.15252/msb.20188322>
- Leonard, A. C., & Méchali, M. (2022). DNA replication origins. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 14(1), 10–22. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a040113>
- Lewis, J. S., & Spenkelink, L. M. (2022). Single-molecule visualization of DNA replication mechanisms in bacteria. *Current Opinion in Microbiology*, 65(1), 71–78.
- Luthifah, H., & Zulyusri. (2024). Analisis Kebutuhan Pengembangan E-Booklet Bernuansa Kontekstual Pada Materi Virus dan Peranannya Sebagai Media Pembelajaran Elektronik Biologi Fase E di SMA Negeri 1 Kecamatan Guguak. *Symbiotic: Journal of Biological Education and Science*, 5(2), 179–187.
- Marinus, M. G., & Løbner-Olesen, A. (2020). DNA methylation and bacterial virulence. *Journal of Bacteriology*, 202(7), 10–29.
- Merchel-Piovesan, C., & De Bont, E. S. (2022). Bacterial replication restart pathways: mechanisms and implications for antimicrobial development. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 86(1), 21–33.
- Muniz, L., Nicolas, E., & Trouche, D. (2021). RNA polymerase II speed: A key player in controlling and adapting transcriptome composition. *EMBO Journal*, 40(15), 201–211. <https://doi.org/10.15252/embj.2020105740>
- Permata Sari, S., Ferry, D., & Sastria, E. (2023). Hubungan Pemahaman Tentang Bioteknologi Dengan Strategi Coping Stress Mahasiswa Tadris Biologi IAIN Kerinci Dalam Menerima Vaksin Covid-19. *Symbiotic: Journal of Biological Education and Science*, 4(1), 50–57. <https://doi.org/10.32939/symbiotic.v4i1.100>
- Prayogi, P., Hasibuan, L. M., Tarigan, N., Nur, H., & Rahmadina, R. (2024). Amitosis, Mitosis dan Meiosis Meteri Genetika dan Replika DNA. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(3), 16414–16422.
- Richardson, T. T., Harran, O., & Murray, H. (2019). The bacterial DnaA-trio replication origin element specifies single-stranded DNA initiator binding. *Nature*, 574(7778), 385–389.
- Sanhueza, D., García, K., & Gaggero, A. (2021). Control of DNA replication initiation in bacteria: a diverse and dynamic landscape. *Current Genetics*, 67(2), 283–294. <https://doi.org/10.1007/s00294-020-01116-1>
- Schier, A. C., & Taatjes, D. J. (2020). Structure and mechanism of the RNA polymerase II transcription machinery. *Genes & Development*, 34(8), 465–488. <https://doi.org/10.1101/gad.335679.119>
- Sharma, A., & Chattoraj, D. K. (2015). Replication termination in bacteria. *Microbiology Spectrum*, 3(1), 71–82. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.MDNA3-0038-2014>
- Silverthorn, D. U., Johnson, B. R., Ober, W. C., Garrison, C. W. G., & Silverthorn, A. C. (2013). *Human physiology: An integrated approach (5th ed.)*. San Francisco, CA: Benjamin Cummings.
- Sinha, A., & Raychaudhuri, S. (2021). Understanding bacterial DNA replication fork regulation: A global

approach. *Journal of Molecular Biology*, 433(16), 89–110.

Soubry, A., Guo, L., & Dolinoy, D. C. (2019). DNA methylation, early life environment, and aging. *Current Environmental Health Reports*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40572-019-00223-6>

Windgassen, T. A., Leroux, M., Satyshur, K. A., Sandler, S. J., & Keck, J. L. (2020). Structure-specific DNA replication primer synthesis by bacterial primases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(37), 22833–22842.